

# **DLR-IB-FA-SD-2016-170**

**iBond - inductive  
Pre-Bonding**

**Projektdokumentation**

Deniz Akin und Hakan Ucan



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**





Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

**DLR-IB-FA-SD-2016-170**

## **iBond – inductive Pre-Bonding**

### **Zugänglichkeit:**

- Stufe 1 (intern und extern unbeschränkt zugänglich)

Stade, Januar, 2017

Der Bericht umfasst: 20 Seiten

Institutsleiter:

Autoren:



Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Deniz Akin

Abteilungsleiter:

Autor 2



Dr. Jan Stüve

Hakan Ucan



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt





## **iBond - inductive Pre-Bonding**

Induktive Vorverklebung von  
Versteifungselementen auf  
Faserverbundbauteile



## Dokumenteigenschaften

Titel	Projekt-Dokumentation
Betreff	iBond - inductive Pre-Bonding
Institut	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Erstellt von	Deniz Akin und Hakan Ucan
Beteiligte	
Geprüft von	
Freigabe von	
Datum	
Version	1.0
Dateipfad	Z:\06_Berichte\02_Abschlussberichte\04_iBond

# Inhaltsverzeichnis

<b>Dokumenteigenschaften .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Vorhaben .....</b>	<b>4</b>
1.1. Leistungsbeschreibung und Forschungshintergrund.....	4
1.2. Zeitrahmen .....	5
<b>2. Probenfertigung .....</b>	<b>6</b>
2.1. Versuchsaufbau .....	6
2.2. Versuchsdurchführung .....	9
2.3. Versuchsergebnisse .....	10
<b>3. Untersuchung zur Prozessautomatisierung .....</b>	<b>11</b>
3.1. Sensor und Steuerung .....	11
3.2. Untersuchungen zur Temperaturverteilung .....	13
3.2.1. Versuchsaufbau.....	13
3.2.2. Versuchsdurchführung .....	13
3.2.3. Versuchsergebnisse .....	14
3.2.4. Diskussion.....	16
<b>4. Ausblick .....</b>	<b>19</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>20</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>20</b>

# 1. Vorhaben

Die Firma Premium Aerotec GmbH (PAG) ist daran interessiert das durch das DLR entwickelte Verfahren der induktiven Stringerheftung für ihre Fertigung von Rumpfstrukturen zu verwenden. Das Vorhaben *iBond – Inductive Pre-Bonding* zielt darauf ab eine Voruntersuchung zur Industrialisierbarkeit des Verfahrens in eine bestehende Fertigungsanlage durchzuführen.

Bei der Integration von vorgefertigten Versteifungselementen in eine Rumpfschale ist es notwendig eine punktuelle Vorfixierung zu erreichen, sodass sie ihre Position während des weiteren Fertigungsprozesses und des Autoklavzyklus beibehalten. Die endgültige Verbindung der beiden Strukturen übernimmt ein Klebefilm, der im Autoklav ausgehärtet wird. Durch die kurzzeitige, punktuelle Erwärmung des Klebefilms kann dieser angelieren und dadurch bereits vor der Aushärtung eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Stringer und Rumpfschale durch Adhäsion erzielen. Das vom DLR entwickelte Verfahren nutzt elektromagnetische Induktion für diese Erwärmung, sodass Hilfe sehr kurze Prozesszeiten von wenigen Sekunden erreicht werden.

## 1.1. Leistungsbeschreibung und Forschungshintergrund

Nach dem Stand der Technik werden für die Vorverklebung konvektionsbasierte Heizarten verwendet. Diese sollen in der Fertigung von PAG Nordenham durch das induktive Verfahren ersetzt werden. Hierzu sind einige Vorversuche notwendig, um eine Industrialisierung zu prüfen und vorzubereiten.

Im ersten Arbeitspaket werden auf Grundlage von vorgegebenen Rahmenbedingungen geeignete Induktionsparameter ausgewählt. Es muss eine Kombination aus den Parametern Leistung, Frequenz und Dauer sowie Induktorbauweise gefunden werden, die die gewünschte Temperaturverteilung einstellt. Diese Vorversuche finden am DLR Standort Stade mithilfe von Materialien und vorgegebenen Versuchsaufbauten statt, die durch PAG gestellt werden. Es werden vor allem Grenzfälle, wie z. B. dickster Stringer und dickstes Material sowie der dünnste Aufbau, untersucht.

Mit dem gefundenen Parametersatz werden in einem zweiten Arbeitspaket Versuche unter Fertigungsbedingungen durchgeführt. Diese werden im PAG Standort Nordenham durchgeführt und evaluiert.

Ein drittes Arbeitspaket sieht die Konzipierung einer temperaturgesteuerten Erwärmung vor. Der Klebefilm muss einerseits auf eine ausreichend hohe Temperatur gebracht werden, damit er hohe Kräfte aufnehmen kann, andererseits darf das umliegende CFK nicht zu stark erwärmt werden, da sonst die Qualität beeinträchtigt wird. Da es bei induktiver Erwärmung bei leicht veränderten Umgebungsbedingungen (z. B. Materialbeschaffenheit) zu Temperaturschwankungen kommen kann, ist eine temperaturgesteuerte und damit qualitätsgesicherte Variante des Verfahrens anzustreben.



Im Rahmen des ersten Arbeitspaketes werden verschiedene Parametersätze für unterschiedliche Bauteildicken ausgewählt. Dabei gilt es eine möglichst geringe Anzahl vorzusehen, da weniger Parametersätze weniger Fehlerquellen nach sich ziehen und somit den Serieneinsatz begünstigen. In einem fünften Arbeitspaket soll daher geprüft werden ob es möglich ist einen einzigen Parametersatz für ein gesamtes Bauteil zu verwenden. Wenn dies Nachteile mit sich bringt, sind diese durch Versuche zu quantifizieren.

## **1.2. Zeitrahmen**

Das Forschungsvorhaben wurde gemeinsam mit dem Partner Premium Aerotec im Zeitraum zwischen dem 1. Juli 2016 bis zum 31. Oktober 2016 durchgeführt.

## 2. Probenfertigung

Auf Wunsch der Auftraggeber wurde das erste Arbeitspaket auf die Anfertigung von Proben für Festigkeits- und G1C Tests ausgeweitet. Ursprünglich sah das AP nur die Ermittlung geeigneter Parameter für die Anwendung in der Fertigung von A350 Rumpfsegmenten in Nordenham vor. Die Proben sollten einen Vergleich zwischen 4 Verfahren ermöglichen: „Heating Device“ (Heizplatte, Stand der Technik), Ultraschallerwärmung, induktive Erwärmung und Verklebung nur durch die Ausübung von Druck.

### 2.1. Versuchsaufbau

Für das Projekt war die Nutzung eines „EW050“ der IFF GmbH vorgesehen. Die Anlage ist Luftgekühlt und hat eine Nennleistung von 5 kW. Die maximale Frequenz liegt bei 30 kHz, wobei die Anlage mit Hilfe der „Hard Chopper“ Technik Arbeit, sodass die Frequenz ohne Änderungen an der Hardware eingestellt werden kann.



Abbildung 1: EW050 Induktionsgenerator

Da diese Anlage die Anforderung auch Proben mit unidirektionalem Lagenaufbau verkleben zu können nicht erfüllte, wurde eine Anlage beschafft, die einen größeren Frequenzbereich abdeckt. Durch den Hersteller Cobes GmbH konnte zeitnah eine Anlage der „i-Class“-Serie mit einer Nennleistung von 1,5 kW und einer maximalen Frequenz von 500 kHz zur Verfügung gestellt werden. Konfiguriert auf eine Resonanzfrequenz von 290 kHz konnten unidirektionale Materialien in einem vertretbaren Zeitraum auf eine Zieltemperatur von 50°C gebracht werden.



Abbildung 2: Induktionsgenerator der Cobes GmbH

Die Erwärmung der Proben wurde auf einem automatisierten Versuchsstand durchgeführt. Der Induktor ist dabei am Endeffektor eines 2-Achs-Portalsystems angebracht (siehe Abbildung 3). Durch Federmechanismen und Kraftsensor werden die Achsen so angesteuert, dass eine einstellbare, reproduzierbare Anpresskraft auf das Werkstück wirkt. Vor und nach dem Erwärmungszyklus befindet sich der Endeffektor ca. 30 cm über dem Werkstück, sodass komfortables Arbeiten und eine freie Sicht gegeben ist.

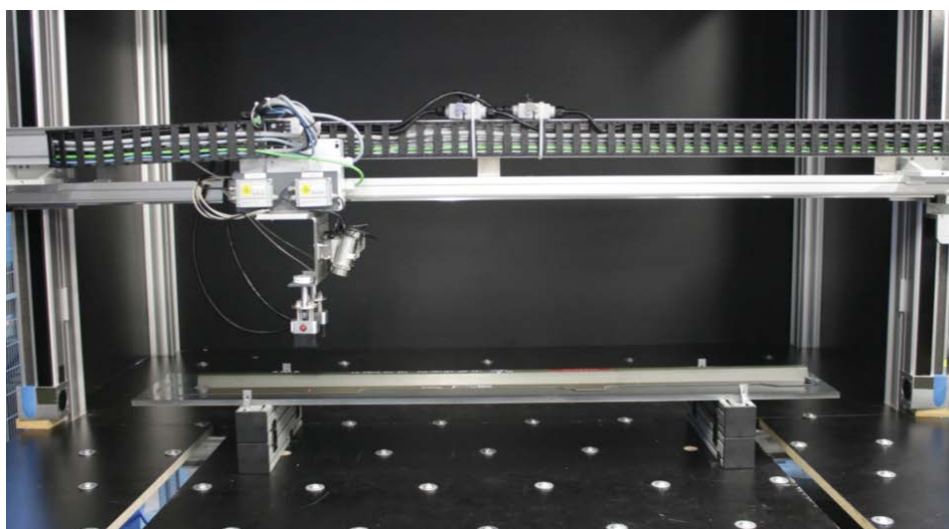


Abbildung 3: Automatisierter Versuchsstand

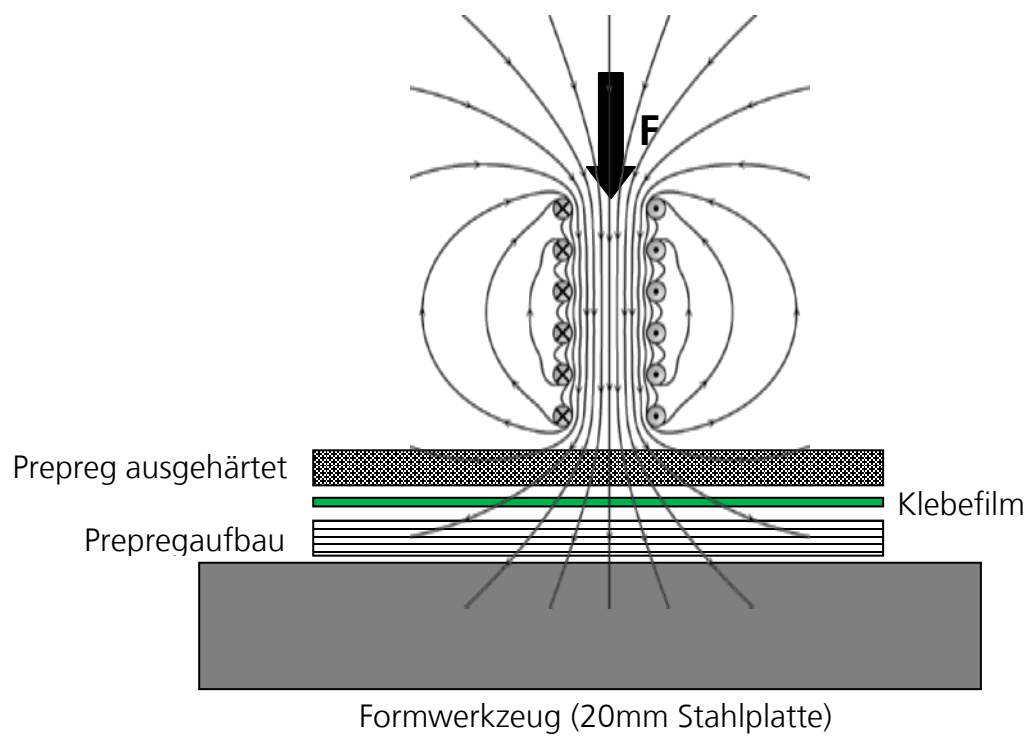


Abbildung 4: Skizze Versuchsaufbau

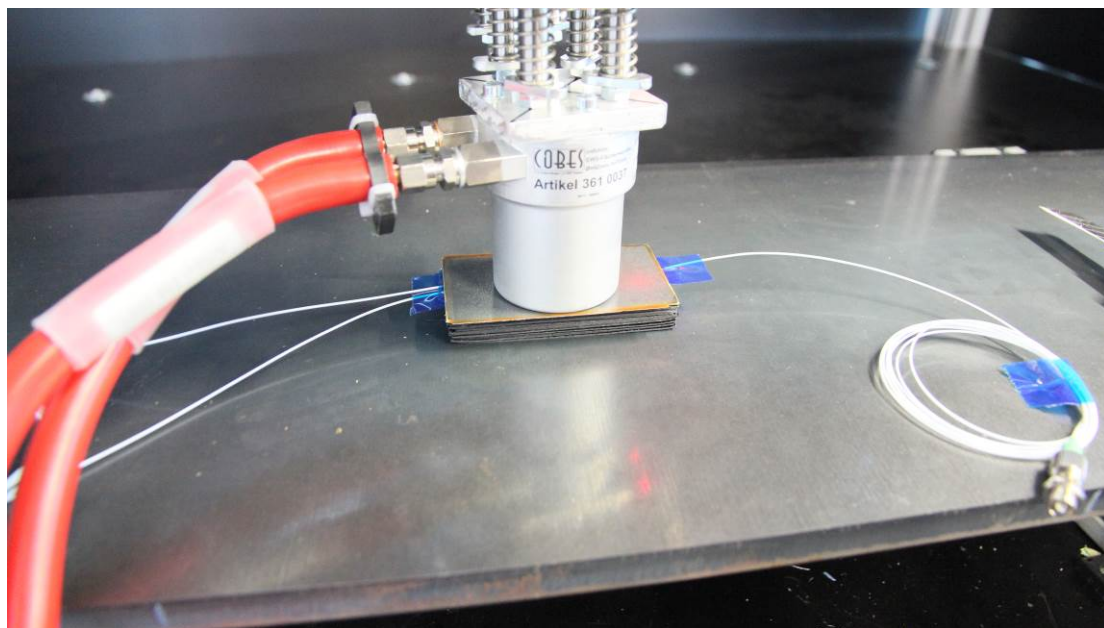


Abbildung 5: Versuchsaufbau Probenfertigung

## 2.2. Versuchsdurchführung

Da mit dem in 2.1 beschriebenen Versuchsaufbau eine Temperaturmessung während des Prozesses nur bedingt möglich ist, wurden für die eigentliche Probenfertigung Vorversuche durchgeführt. So wurden vorher Prozessparameter (Soll-Leistung und Erwärmungsdauer), die zu einer gewünschten Temperaturverteilung führen, ermittelt. Dabei wurden die Temperaturen an verschiedenen Stellen mit verschiedenen Hilfsmitteln gemessen:

Eine Thermografiekamera wurde schräg auf die Oberfläche des Versuchsaubaus gerichtet, sodass die Oberflächentemperatur nach dem Erwärmungsvorgang gemessen werden konnte. Hier musste eine kleine Verzögerung in Kauf genommen werden, da die Sicht auf die Oberfläche des ausgehärteten Materials erst frei wurde, wenn der Induktor nach dem Zyklus wieder hochgefahren ist.

Da die Temperaturverteilung bei der induktiven Erwärmung stark mit den Materialien und Prozessparametern variiert ist die Messung der Temperatur auch im Inneren des Aufbaus notwendig. Hier wurden Temperaturmessstreifen wie in Abbildung 5 dargestellt eingesetzt. Zwar kann nur mit einer geringen Temperatur- und Ortsauflösung gemessen werden, dafür sind die Messstreifen jedoch vollständig unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Einflüssen. Außerdem sind sie hinreichend dünn, um den Prozess nicht signifikant zu beeinflussen.

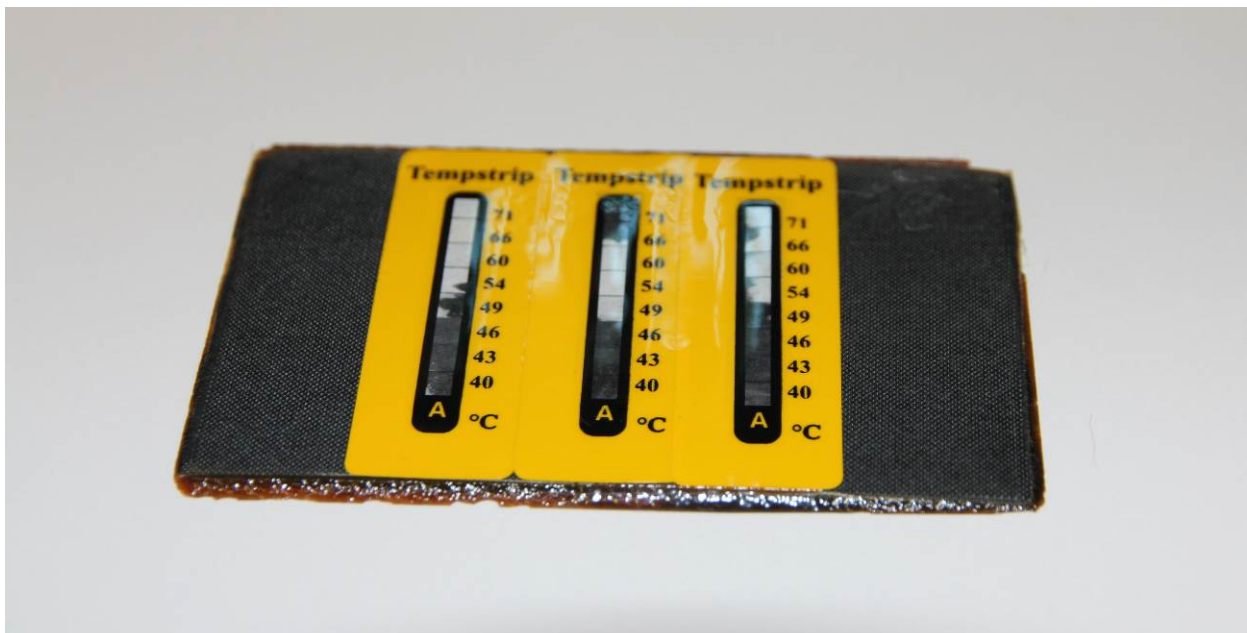


Abbildung 6: Temperaturmessstreifen

Als weiteres Temperaturmessverfahren wurden Fiber Bragg Gratings eingesetzt. Sie werden ebenfalls nicht durch EM Einflüsse gestört und liefern Messwerte mit einer hohen Frequenz. Allerdings sind sie sehr anfällig auf mechanische Beanspruchung in axialer Richtung der Lichtwellenleiter. Trotz rein vertikaler Belastung (bei horizontaler Lage des Lichtwellenleiters)

konnten keine hinreichend reproduzierbaren Messergebnisse erzielt werden. Daher wurde auf eine weitere Verwendung dieser Messmethode verzichtet.

## **2.3. Versuchsergebnisse**

Mit der in 2.2 beschriebenen Methode wurden zwei Reihen von Klebproben hergestellt. Eine wurde für Zugversuche verwendet und ein Satz unidirektionale Proben für G1C Tests. Diese Versuche wurden beim Auftraggeber durchgeführt. Es liegt dem DLR eine Dokumentation dieser Versuche in Form der studentischen Abschlussarbeit von Herrn Lukas Haack vor. Daher werden die Ergebnisse hier nicht detailliert sondern in Form einer Zusammenfassung vorgestellt.

Für den industriellen Einsatz bei der Fertigung von Airbus A350 Rumpfstrukturen wurden insgesamt vier Verfahren für die Vorverklebung von Versteifungselementen untersucht und miteinander verglichen: Ultraschallschweißen, Erwärmung durch eine flächige Wärmequelle (Heating Device - Zurzeit im Einsatz und soll aufgrund langer Zykluszeiten abgelöst werden), Vorverklebung ohne Temperatur sondern nur durch Druckeinwirkung und die induktive Erwärmung.

Als Messwert dienten unter anderem die Festigkeits- und G1C Versuche. Alle Verfahren haben hier die Minimalanforderungen eingehalten und vergleichbare Ergebnisse erzielt. Bei einer anschließenden Fehler-Möglichkeiten-Einfluss-Analyse (FMEA) ging die induktive Erwärmung als geeignetstes Verfahren hervor.



### 3. Untersuchung zur Prozessautomatisierung

Um die Notwendigkeit von Vorversuchen und festen Parametersätzen zu vermeiden, wurden verschiedene Konzepte getestet, die mithilfe eines optischen Temperatursensors eine definierte Erwärmung ermöglichen sollten. Nach einigen Versuchen zu Heizrate, Prozesssicherheit und Präzision wurde ein Verfahren ausgewählt und Untersuchungen zur Temperaturverteilung durchgeführt.

#### 3.1. Sensor und Steuerung

Der verwendete Induktor besteht aus einer helixförmigen, eingegossenen Spule und hat ein durchgängiges Loch in der Mitte. Mithilfe eines 3D gedruckten rotationssymmetrischen Adapters wurde ein CTFast Pyrometer von Optris integriert:

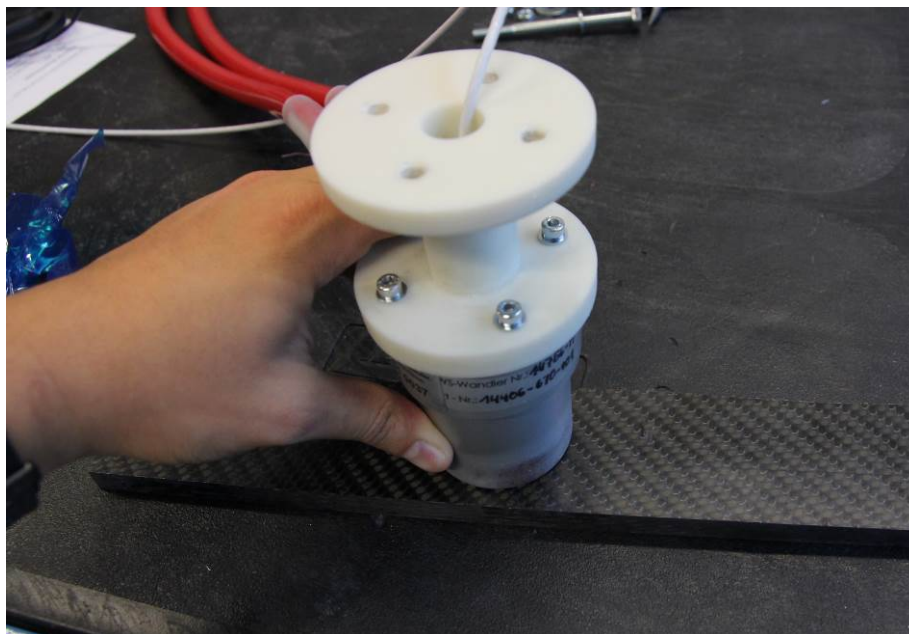


Abbildung 7: Sensorintegration am Induktor

Der Induktionsgenerator kann über digitale und analoge Schnittstellen beliebig angesteuert werden. Damit sind alle Voraussetzungen für eine Regelung oder Steuerung gegeben. Zum flexiblen Testen verschiedener Reglertypen wurde eine Labview Umgebung auf Basis eines DAQCompact Chassis verwendet. Hier konnten sowohl PID Regler als auch höherentwickelte modellbasierte Regelungen – wie z.B. Smith Prädiktor - getestet werden. Es zeigte sich, dass nach eingehender Parametrierung präzise und schnelle Regelverhalten erreicht werden konnten, sie jedoch empfindlich auf eine in der Praxis durchaus vorkommende Änderung der Regelstrecke (z.B. anderer Stringer- oder Hautfeldaufbau, andere Temperaturen) reagieren. Als sehr robust hat sich ein Temperaturterminiertes Verfahren erwiesen, das mit einer einstellbaren konstanten Leistung heizt und bei Erreichen einer bestimmten Solltemperatur die Leistung abschaltet.

Dieses Verfahren wurde für die weitergehende Verwendung ausgewählt und in eine Siemens S7-1214 SPS implementiert. Diese wurde in einen Schaltschrank nach Industriestandard integriert:



Abbildung 8: Schaltschrank mit Siemens SPS

Das zu dem Programm entwickelte HMI ist in Abbildung 9 dargestellt. Hier ist auch ein Temperaturgesteuerter Erwärmungszyklus zu sehen. Die Verzögerung des Sollwertsprungs zum Einschalten der Leistung ist auf eine frühe manuelle Version zurückzuführen.

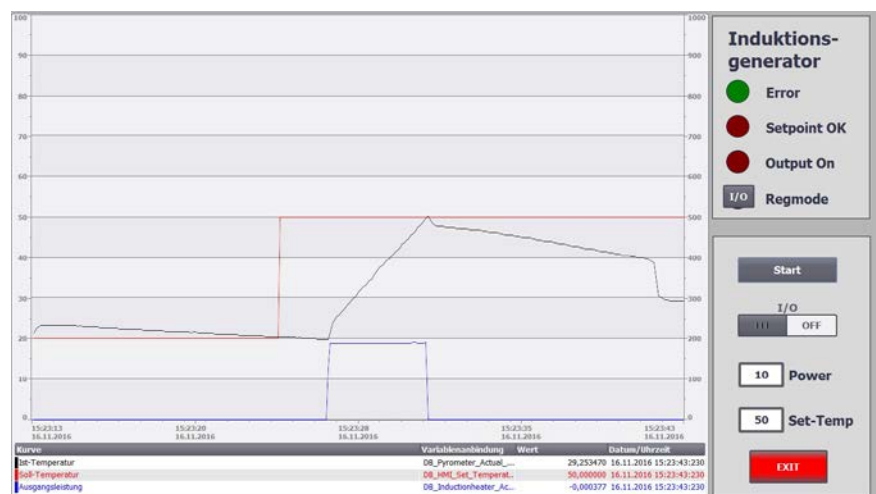


Abbildung 9: Temperatursteuerung HMI



## 3.2. Untersuchungen zur Temperaturverteilung

Die kritischste Stelle bei der Vorverklebung ist die oberste Lage Prepreg direkt unter dem Stringer. Hier ist die Temperatur am höchsten und es muss sichergestellt werden, dass 55°C nicht überschritten werden. Die Induktive Erwärmung beheizt das Material nicht gleichmäßig, sodass festgestellt werden muss in welchem Zusammenhang die Temperatur des Pyrometermessfeldes und die Stringerunterseite stehen. Da nun eine Ansteuerungsmethode ausgewählt ist, können weitergehende Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt werden.

### 3.2.1. Versuchsaufbau

Wie in Abbildung 9 dargestellt sind Induktor und Pyrometer horizontal angeordnet und liegen an dem vertikal aufgestellten Stringer an. Auf diese Weise kann die Temperatur und die Temperaturverteilung an der Unterseite des Stringer mit einer Thermokamera aufgenommen werden.

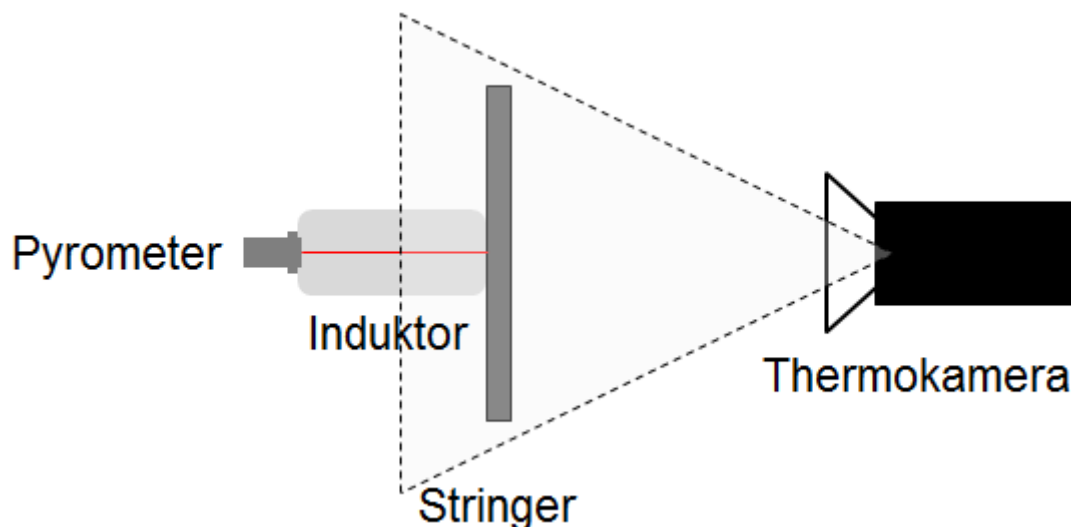


Abbildung 10: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Temperaturverteilung

### 3.2.2. Versuchsdurchführung

Mit diesem Versuchsaufbau wurde unter Einsatz des zuvor beschriebenen Ansteuerungsverfahrens versucht auf der Unterseite des Stringers kurzzeitig eine maximale Temperatur von 50 – 55°C zu erreichen. Da sich schon bei ersten Tests zeigte, dass die maximale Temperatur auf der Unterseite deutlich höher liegt als das Pyrometer auf der Oberseite misst wurde die Leistung auf 1% und 2% reduziert. Damit konnte eine gleichmäßigere Erwärmung erreicht und die Intensität der Hotspots reduziert werden. Mit diesen beiden Leistungen und den drei relevanten Stringerdicken der zu fertigenden Rumpfsegmente wurden Zusammenhänge zwischen der Pyrometertemperatur und der Temperatur auf der Unterseite ermittelt. Daraus ergeben sich die je nach Klebepunkt einzustellenden Solltemperaturen für eine sichere Verklebung ohne Übertemperatur.

### 3.2.3. Versuchsergebnisse

Die Versuche mit 1% und 2% der Nennleistung des Induktionsgenerators wurden jeweils zusammen in die Diagramme der Stringer mit den Dicken 1,5 mm, 2,4 mm und 3 mm eingetragen. Auf den x-Achsen können jeweils die erzielten Temperatursprünge – also Differenzen – auf der Oberseite abgelesen werden. Die mittels Thermokamera gemessenen Temperaturdifferenzen auf der Unterseite sind jeweils auf den y-Achsen eingetragen, wobei jeweils die maximalen Temperaturen des Thermobilbes verwendet wurden. Die Messungen sind in Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 durch Punkte dargestellt. Jeweils eine Regressionsgerade deutet einen linearen Verlauf an.

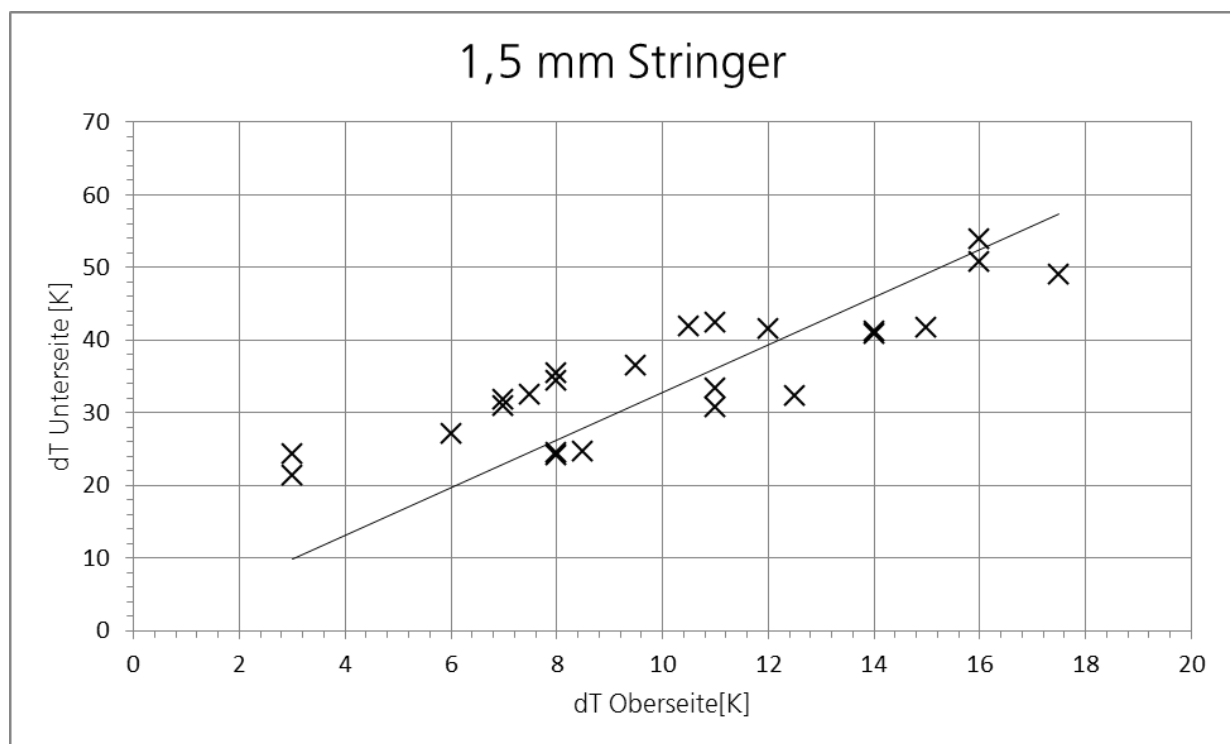


Abbildung 11: Messergebnisse 1,5 mm Stringer

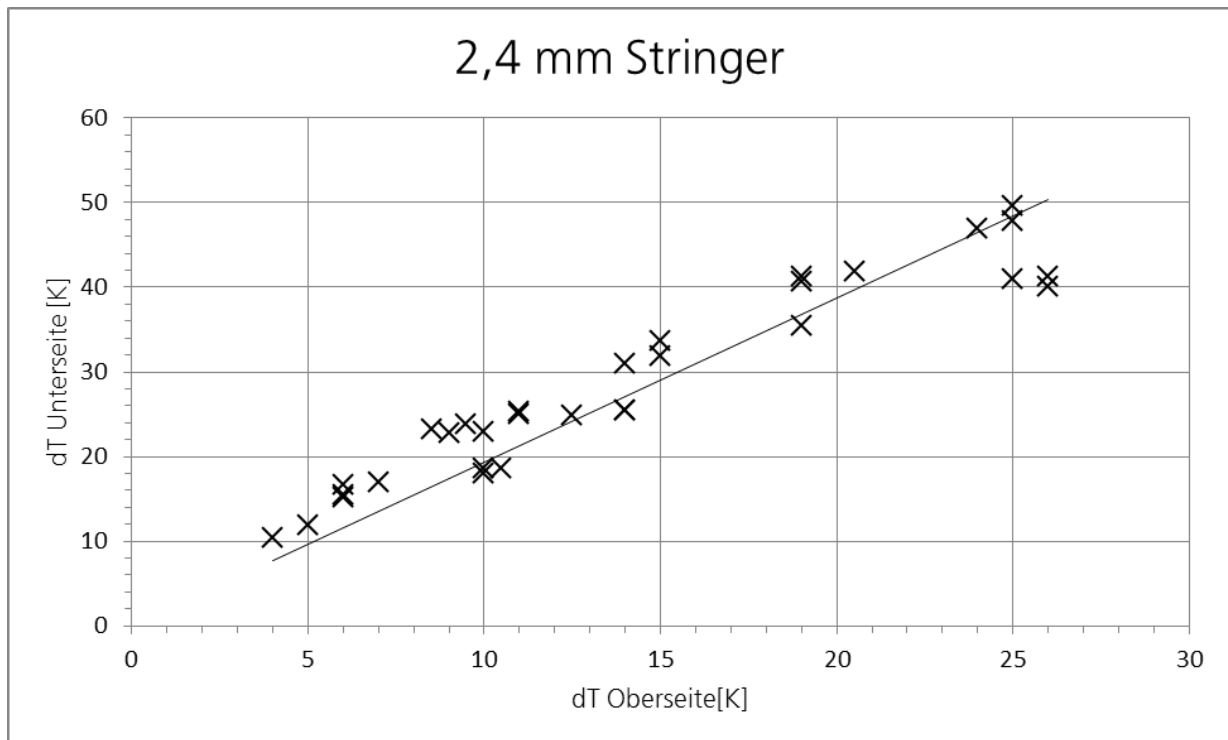


Abbildung 12: Messergebnisse 2,4 mm Stringer

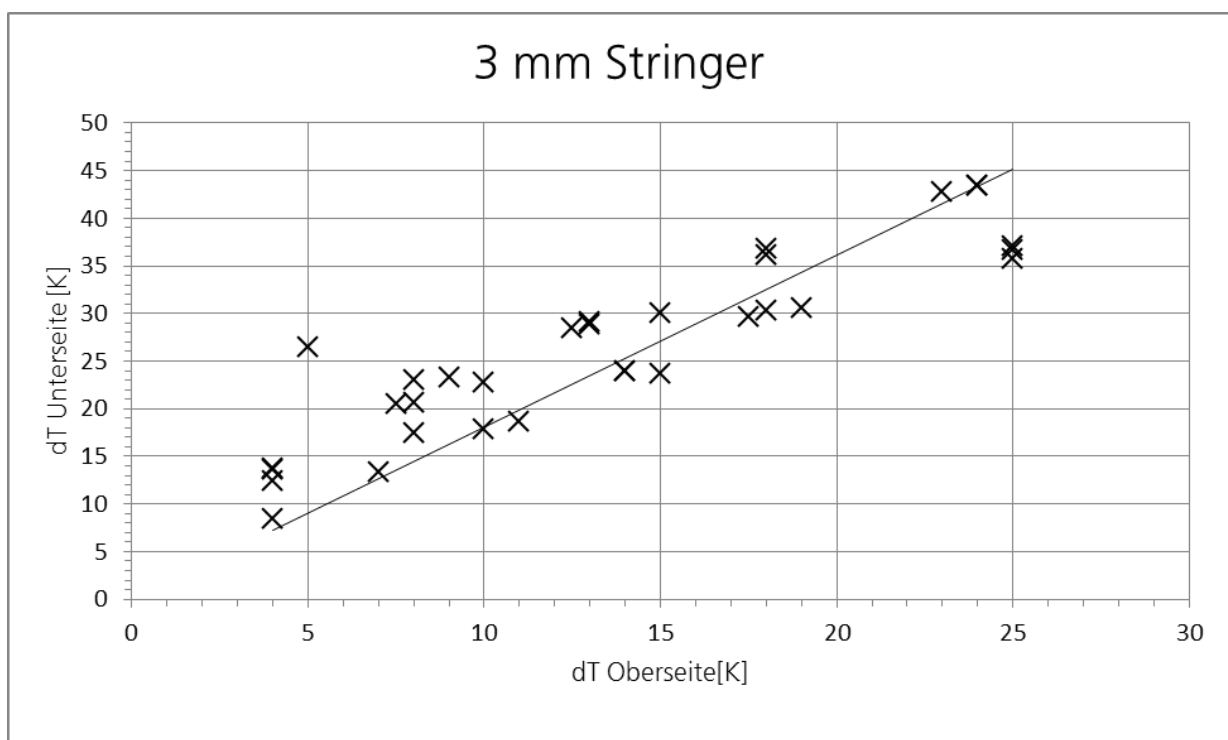


Abbildung 13: Messergebnisse 3 mm Stringer

Die Steigungen der Regressionsgeraden sind in Tabelle 1 eingetragen.

Tabelle 1: Steigungen der Regressionsgeraden

Stringertyp [mm]	Steigung [K/K]
1,5	1,95
2,4	1,57
3	1,25

### 3.2.4. Diskussion

Wie in Abbildung 13 ersichtlich, liegt der Messpunkt des Pyrometers im kältesten Punkt des Erwärmungsmusters. Das liegt vermutlich an der Bohrung im Induktor, welche den magnetischen Fluss erheblich reduziert. Dies erklärt die hohe Diskrepanz zwischen der Maximaltemperatur an der Stringerunterseite und den Messwerten des Pyrometers.

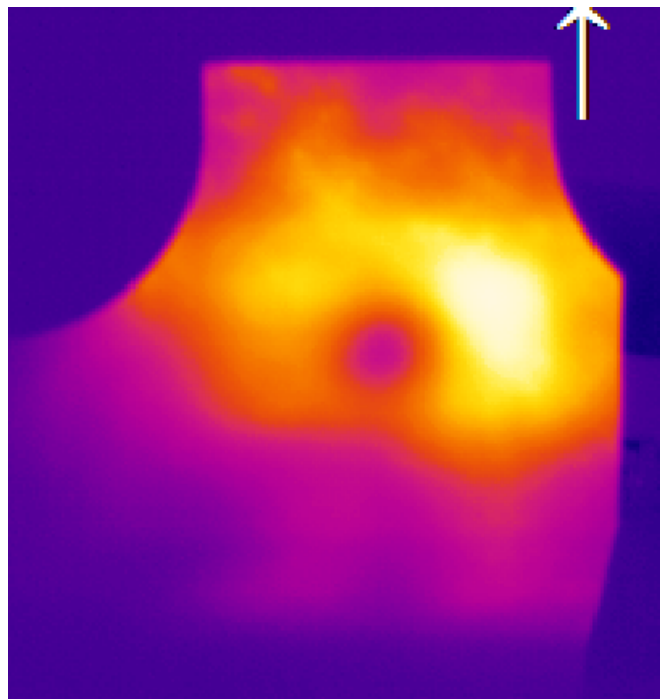


Abbildung 14: Thermografieaufnahme vom Pyrometer Coldspot

Darüber hinaus entstehen auf der Stringerunterseite Hotspots bei der Erwärmung (siehe Abbildung 14). Die Intensität ist umso größer, je höher die Erwärmungsleistung eingestellt ist. Aufgrund dieser Hotspots musste die Leistung bei den Versuchen auf 1% und 2% verringert werden. Dadurch verlängert sich ein Erwärmungszyklus von 2-5 Sekunden auf 10 -15 Sekunden. Diese Anomalien scheinen materialspezifisch zu sein, z.B. an Stellen bei denen sich die Lagen besonders gut oder besonders schlecht kreuzen bzw. berühren.

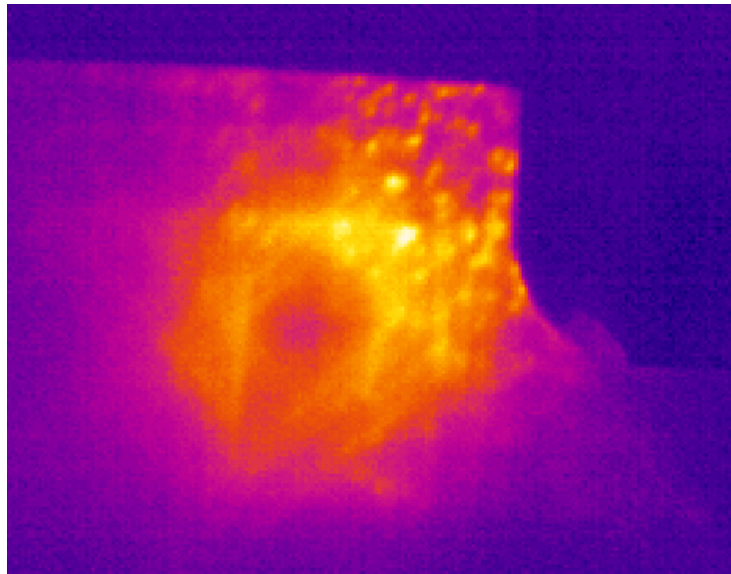


Abbildung 15: Thermografieaufnahme am Anfang der Erwärmung

Abbildung 15 zeigt die Erwärmung einer infundierten Gewebepatte. Hier treten die Hotspots nicht auf. Auch bei Prepregmaterialien konnte in der Vergangenheit eine gleichmäßige Erwärmung erzielt werden.

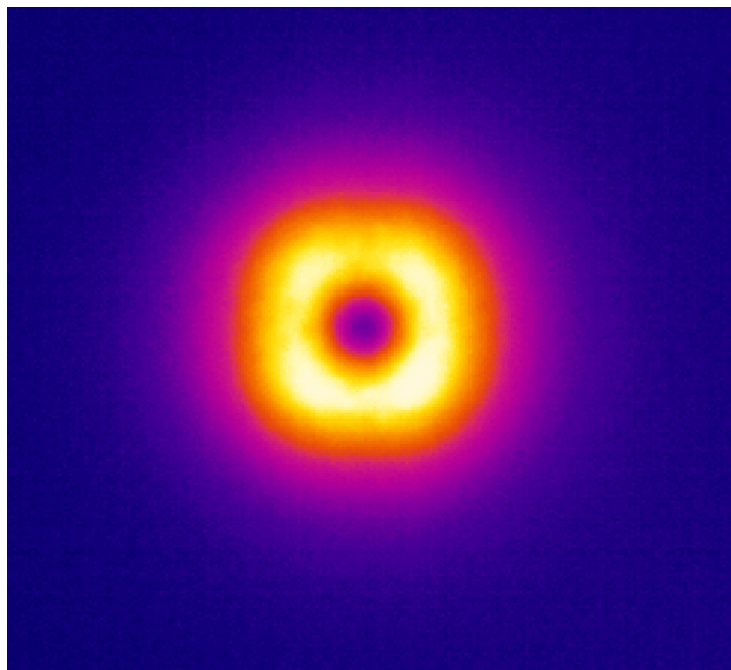


Abbildung 16: Thermografieaufnahme der Erwärmung einer infundierten Platte

Ein weiterer negativer Einflussfaktor auf den Prozess ist die Wasserkühlung des Induktors. Bei den Versuchen wurde Frischwasser verwendet, dessen Temperaturen großen Schwankungen unterliegt. Bei niedrigen Außentemperaturen kühlt das Wasser den Materialaufbau vor einem

Erwärmungsversuch ab, was die Ergebnisse weniger reproduzierbar macht. Da für die Vorverklebung von Stringern eine rasche Abkühlung nach der Erwärmung jedoch von Vorteil ist, kann dieser Umstand auch zum Vorteil genutzt werden. Abbildung 16 zeigt den Effekt kurz vor einer Messung.

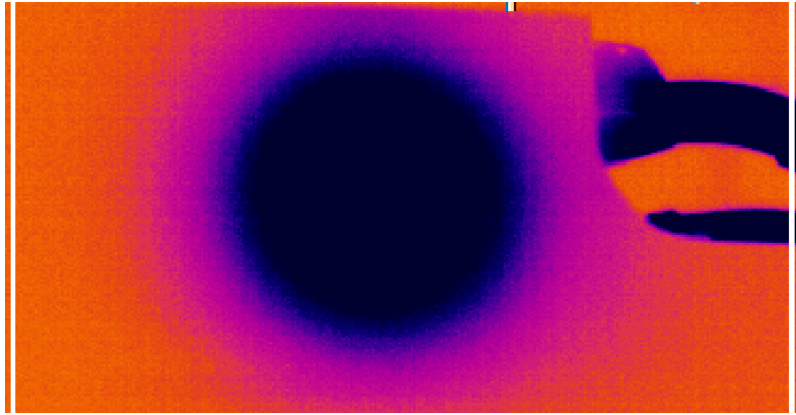


Abbildung 17: Abkühlung des Versuchsaufbaus durch Wasserkühlung

## 4. Ausblick

Für eine weitergehende Industrialisierung des Verfahrens der induktiven Vorverklebung sind einige Maßnahmen zur Optimierung zu treffen. Obwohl es sich gegenüber Ultraschallschweißen und der Heizflächen durchsetzen konnte, birgt die Induktion noch Anpassungspotential für diese Anwendung.

Bei der in diesem Projekt verwendeten Induktionsanlage handelt es sich um ein Laborgerät. Das Netzteil ist für die geringen benötigten Leistungen überdimensioniert und kann deutlich verkleinert werden. Dafür muss die Hardware auf zwei gleichzeitig angeregte Induktoren erweitert werden. Das halbiert zum einen die Zykluszeit pro Klebepunkt, da immer beidseitig verklebt wird, zum anderen ist es zwingend notwendig, da der Endeffektor der Stringerintegrationsanlage auf diese Weise ausgelegt ist.

Auch der Oszillator kann auf eine geringere Leistung ausgelegt werden. Das macht ihn kompakter und leichter, sodass eine Integration von zwei Oszillatoren in den Endeffektor eines Roboters vereinfacht wird. Unter Fertigungsbedingungen ist die Wasserkühlung der Anlage zu unsicher. Das Risiko einer Leckage und der Zerstörung eines Bauteils ist zu hoch. Daher sollte die Kühlung durch Luft erfolgen.

Eine Verbesserung der Temperaturverteilung und eine generelle Erhöhung der Heizfläche kann durch alternative Spulendesigns erfolgen. Die hier verwendete Helixspule hat eine sehr ungleichmäßige Temperaturverteilung (siehe Abbildung 13). Hinzu kommt, dass die Temperaturmessung bei diesem Induktor an der kältesten Stelle erfolgt. Diesen Umstand gilt es bei der Konstruktion eines neuen Induktors zu verhindern.

Eine wichtige Erkenntnis dieses Projektes ist die Wirkung der Frequenz. Mit höheren Frequenzen können deutlich höhere Energieeinträge in das Material erzielt werden. In der Metallverarbeitung haben höhere Frequenzen den Nachteil der verringerten Eindringtiefe aufgrund des Skineffekts. Da CFK kein durchgängiger Leiter ist, tritt der Skineffekt hier nicht bzw. nur in sehr abgeschwächter Form auf. Ein nennenswerter Skineffekt innerhalb einer Faser tritt aufgrund der Größe der Fasern und den Materialeigenschaften von Kohlenstoff erst ab Frequenzen jenseits der 100 MHz auf. Zum Zwecke der Verkleinerung der Hardware sollte eine maximale Erhöhung der Frequenz in Betracht gezogen werden. Die halbleiterangeregte Schwingkreis Technik schafft im Industriemaßstab derzeit ca. 1 MHz.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: EW050 Induktionsgenerator .....	6
Abbildung 2: Induktionsgenerator der Cobes GmbH .....	7
Abbildung 3: Automatisierter Versuchsstand .....	7
Abbildung 4: Skizze Versuchsaufbau .....	8
Abbildung 5: Versuchsaufbau Probenfertigung .....	8
Abbildung 6: Temperaturmessstreifen .....	9
Abbildung 7: Sensorintegration am Induktor .....	11
Abbildung 8: Schaltschrank mit Siemens SPS .....	12
Abbildung 9: Temperatursteuerung HMI .....	12
Abbildung 10: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Temperaturverteilung .....	13
Abbildung 11: Messergebnisse 1,5 mm Stringer .....	14
Abbildung 12: Messergebnisse 2,4 mm Stringer .....	15
Abbildung 13: Messergebnisse 3 mm Stringer .....	15
Abbildung 14: Thermografieaufnahme vom Pyrometer Coldspot .....	16
Abbildung 15: Thermografieaufnahme am Anfang der Erwärmung .....	17
Abbildung 16: Thermografieaufnahme der Erwärmung einer infundierten Platte .....	17
Abbildung 17: Abkühlung des Versuchsaufbaus durch Wasserkühlung .....	18

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Steigungen der Regressionsgeraden .....	16
--	----